

# Compensation of 110 kV Cable Lines – Possibilities and Limitations

## Authors

Piotr Kacejko  
Paweł Pijarski  
Sylwester Adamek

## Keywords

reactive power compensation, wind farm

## Abstract

This paper discusses problems of the compensation of 110 kV cable lines tens of kilometres long. Such lines are currently built primarily to connect a wind farm, as a consequence of the difficulties in obtaining permits for overhead line construction. Practical design problems derive from the fact of an undetermined cable capacitance and choke reactance (individually manufactured custom devices) and the voltage variation at the interconnection point. With a probabilistic approach possible solutions are suggested for selecting compensation devices.

**DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015303**

## 1. Introduction

Nowadays, 110 kV cable lines with lengths considerably exceeding several kilometres are a staple element of the power engineering system in Poland. Their use results from the determination of the investors from the wind farm sector to connect the scheduled and currently constructed wind farms to the power grid. As the conditions for the development of the areas between the wind farms and the points of common coupling (PCC) prevent the construction of less costly overhead lines, the cable variant is the only viable solution. The operators of the 110 kV grid describe these cable lines as subscriber lines, establishing their requirements at the connection point of the cable to PCC, and leaving the lines at the disposal of wind farm operators. The control of reactive power, which is generated to a great extent by cable lines, and its coordination with generation capacities of a wind farm are becoming a crucial design issue. A theoretically simple solution which uses the *shunt reactor* (SR) at the terminal of a cable line is associated with the selection of a fixed SR. However, the variability of grid operating conditions (voltage in PCC, active power of a wind farm) and uncertainty of the design parameters of the cable and the shunt reactor (these elements are not manufactured on a repetitive basis), necessitate the use of other solutions: *variable SR* and costly flexible AC transmission systems (FACTS) with a static VAR compensator (SVC). The article presents a method of alternative selection of FSR and VSR systems, which takes into consideration the above-mentioned limitations. The article also includes a recommendation for the grid operators to determine, in the issued connection conditions and connection

agreements, the tolerance level of the formulated requirements relating to reactive power compensation, participation of the wind farm in voltage control, and the quantity of supplied or absorbed reactive power. In practice, excessive attempts of the designers to meet these requirements crucially increase the costs of connecting to the grid, without resulting in significant systemic benefits [6, 7].

## 2. Model of a cable line with a compensation system – convention and probabilistic aspects

The conventional literature [1] suggests that a cable line which is several dozen kilometres long should be modelled as a long cable line with distributed parameters. On the other hand, this type of cable line is created by connecting together several *cross bonding sections* [2], each of which can be modelled using the simplified type  $\Pi$  model. As a result, it is possible to use a model with a ladder structure (Fig. 1). The model of a power system may be a multi-node accurate model, or it may be its equivalent. For the model configured in this way, the selection of reactance  $X_L$  of the shunt reactor seems to be a trivial calculation procedure: the shunt reactor is considered as well suited if for the wind farm in idle state, in the connection point of the cable line to the system (PCC node, PK measurement point), in rated voltage conditions  $U_{PCC} = U_N$ , the flow of reactive power shows a zero value, i.e.  $Q_{PK} = 0$ . The reactance value of the shunt reactor selected in this way can be designated as  $X_{Ln}$ . Nonetheless, this simple calculation procedure faces practical difficulties in the form of uncertainties in meeting the design

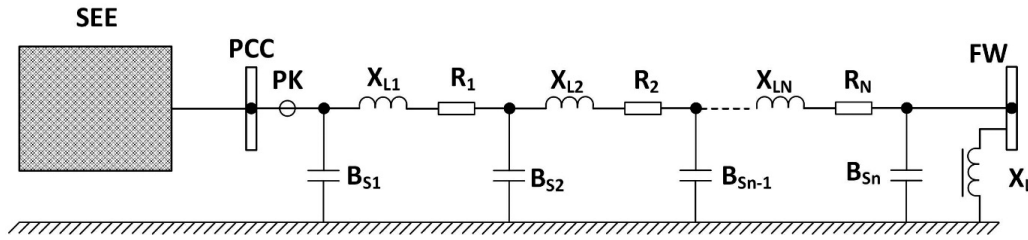


Fig. 1. Calculation model of a cable line taking power from a wind farm (FW) with a shunt reactor

parameters by the manufacturers – of both the 110 kV cable and the shunt reactor itself.

The cable capacity and the inductance of the shunt reactor can be considered as determined if the cable line is built and the shunt reactor is supplied to the 110 kV switching substation of a wind farm and assembled. Manufacturers are not keen on specifying the tolerance in the accuracy of the previously declared parameters; however, sooner or later information on these tolerances usually finds its way into agreements concluded with investors. In addition, it should be considered that the requirements relating to deadlines of an investment process necessitate simultaneous ordering of cables and shunt reactors from their manufacturers. As a result of the general nature of this article, it has been assumed that the design inaccuracies in the manufacturing process of the 110 kV cables and 110 kV shunt reactors are defined by the Gaussian distribution. Therefore, the unit susceptance  $B_K$  for a cable line can be treated as a random variable, and the likelihood that its value is lower than or equals the value of  $b_K$ , is defined by this dependence:

$$P(B_k \leq b_k) = \Phi\left(\frac{b_k - B_{kn}}{\sigma_k}\right) \quad (1)$$

and analogously for the shunt reactor, the likelihood that the reactance value  $X_L$  will be lower than or will equal the value of  $x_L$ , is defined by this dependence:

$$P(X_L \leq x_L) = \Phi\left(\frac{x_L - X_{Ln}}{\sigma_L}\right) \quad (2)$$

whereby, in both cases, the function  $\Phi$  signifies a distribution function of normal distribution  $N(0,1)$ , while  $B_{kn}$  and  $X_{Ln}$  signify respectively the values of unit susceptance of the 110 kV cable and reactance of the shunt reactor assumed by the manufacturers as rated on the basis of the calculations defined above. The uncertainty connected to the manufacturing processes (of cables and shunt reactors) expresses standard deviation (respectively for the cable  $\sigma_k$ , and for the shunt reactor  $\sigma_L$ ). On the basis of the limited information provided by the manufacturers, it was assumed (pessimistically, in the opinion of the authors) for both elements: values  $3\sigma_k/B_{kn} = 0.075$  and  $3\sigma_L/X_{Ln} = 0.075$ . This means

that the “3-sigma criterion” encompasses an area with the width of  $\pm 7.5\%$  in relation to the values considered as rated.

Voltage on the PCC substation bus bars is a grid parameter with a variable value. Probably, the stochastic approach can also be used here, assuming that the most likely voltage value for a large system substation is  $1.05U_N$  (i.e. 115.5 kV), and values considerably lower (e.g.  $0.95U_N$  or  $1.10U_N$ ) feature rarely and are connected to unusual modes of the electrical power system. On the other hand, the requirements of the operators leave no room for doubt that it is necessary to meet the compensation conditions for the full range of expected voltages, from  $0.90U_N$  to  $1.10U_N$ . Consequently, the methodology of the conducted research in every case included scanning of the full range of voltages on the PCC bus bars, as specified above.

### 3. Ineffectiveness of the deterministic approach – results of the Monte Carlo simulation

Assuming the random nature of the  $B_K$  and  $X_L$  parameters, the compensation effectiveness of the capacity of the cable line which uses a fixed shunt reactor can be assessed using the Monte Carlo simulation. Assuming the probability distributions defined by means of formulas (1) and (2), the suitable pair  $(B_K, X_L)$  can be selected randomly by means of a random number generator and the result of this random selection of the cable’s capacity and inductance of the shunt reactor can be verified by means of power flow calculations.

The computational verification should cover the entire range of voltages permissible on the PCC substation bus bars. The results of this type of simulation for 100 randomly selected pairs (unit susceptance of the cable, inductance of the shunt reactor), are presented in Fig. 2, while the percentage degree of the compensation was defined as:

$$\Delta Q_{\%} = \frac{Q_C - Q_L}{Q_{kn}} \cdot 100 \quad (3)$$

where, the power of the shunt reactor ensuring perfect compensation was defined as  $Q_{kn}$ , with capacity  $B_{kn}$  and voltage  $U_{PCC} = U_N = 110$  kV.

As shown in Fig. 2, the random nature of the parameters of the cable and the shunt reactor causes that for the value of voltage in PCC amounting to 121 kV, the compensation degree instead of reaching the zero value, can amount to as much as 10% (both

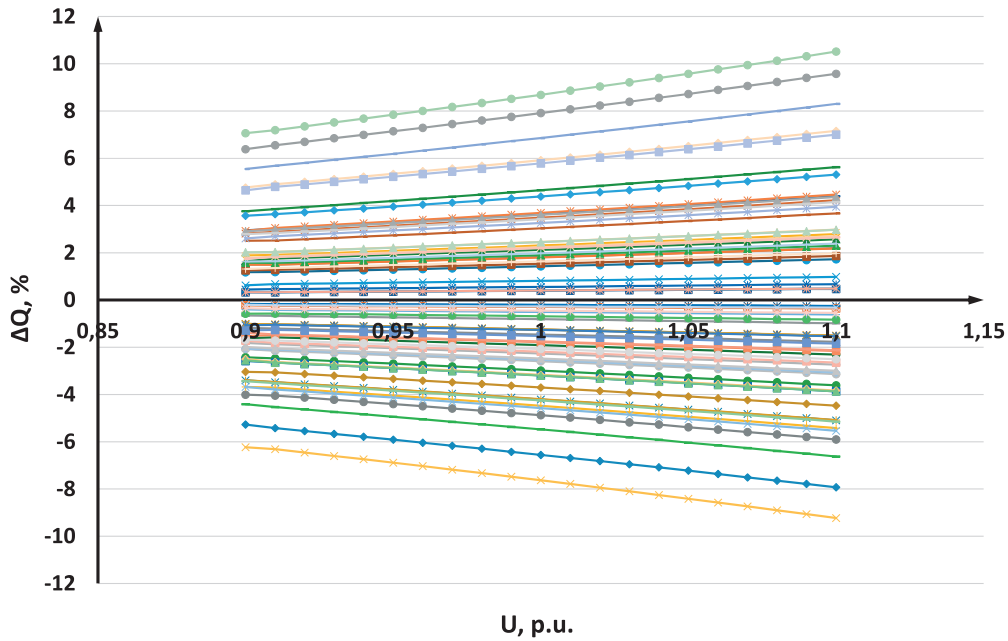


Fig. 2. Compensation degree of a cable line – results of the Monte Carlo simulation for randomly selected pairs  $(B_k, X_L)$  and a full range of changes to voltage in PCC

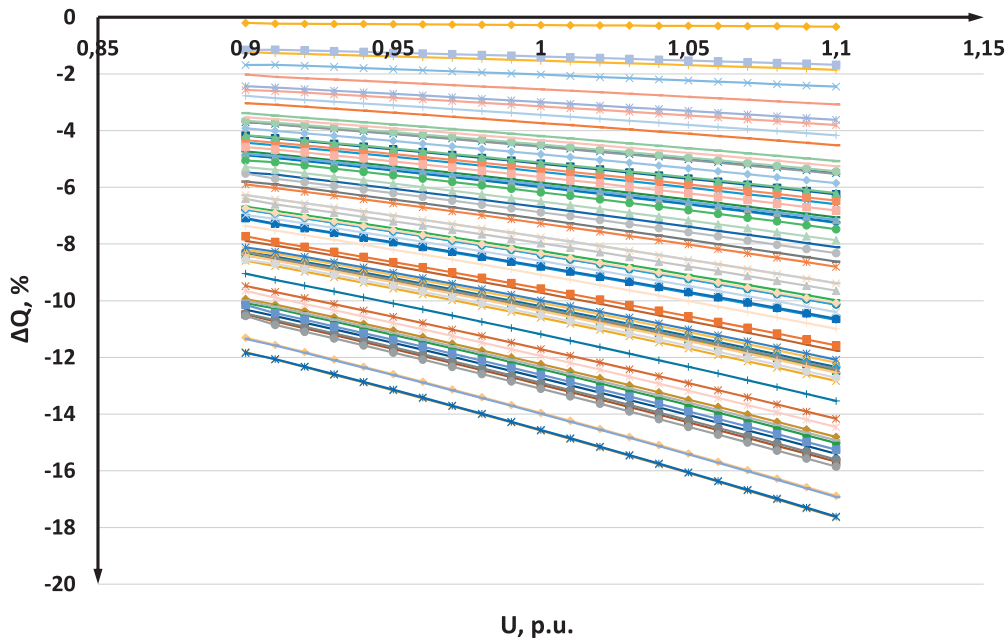


Fig. 3. Compensation degree of a cable line – results of the Monte Carlo simulation for randomly selected pairs  $(B_k, X_L)$  and a full range of changes to voltage in PCC, with the rated reactance of the shunt reactor increased to value  $X_{Lp}$

in the positive and negative direction). This means that with the load power of 100 Mvar (e.g. two cable lines operating in parallel, with a length of 50 km), undercompensation of 10 Mvar (insufficient power of the shunt reactor) or overcompensation of 10 Mvar (excessive power of the shunt reactor) can be expected. From a practical point of view, undercompensation is much more problematic as the shunt reactor's power cannot be increased,

and its replacement is not viable due to the costs involved. Consequently, the authors of this article suggest an alternative approach – as the rated value of the shunt reactor's reactance determined for the manufacturer in the order the following should be provided:  $X_{Lp} = (1 + 3\sigma_L) * X_{Ln}$ . The shunt reactor with reactance defined in this way will also be subject to the random manufacturing process defined using the Gaussian distribution,

analogous as in the previous case. However, in this case, the random nature of the shunt reactor's reactance and the capacity of the cable will never result in undercompensation of the cable line – it will always be overcompensation, as illustrated in Fig. 3. Dealing with overcompensation is relatively simple – it can be performed using capacitors connected to MV bus bars of the wind farm's substation. These capacitors are manufactured in series and are relatively easy to obtain, therefore, a decision on their number and power may be taken at a later stage of the investment process. Looking at Fig. 2 it could be concluded that the overcompensation degree features in the range between zero and -18%. However, it could also be determined that it is justified to install "blindly" a six-part battery with power equaling 12% of  $Q_{kn}$ , with the potential to add additional units with a total power of 8% of  $Q_{kn}$  (total battery power 20%  $Q_{kn}$ ). The reason for this approach is outlined further in this article.

#### 4. Alternative solution – variable shunt reactor

The use of a shunt reactor with fixed (although initially unspecified) reactance with a capacitor battery on the MV side solves the compensation problem even in the event of uncertainty relating to the capacity of the cable line and also in the conditions of voltage variability on the PCC bus bars. The use of a shunt reactor with fixed reactance value (FSR) can be substituted with the use of a variable shunt reactor (VSR). Only selected manufacturers of these reactors manufacture individual items whose power is defined in line with the following dependence:

$$Q_L = Q_{Ln} \frac{(U / U_N)^2}{(Z / Z_N)^2} = Q_{Ln} \cdot (U / U_N)^2 \cdot \left( \frac{100}{100 + N \cdot \Delta R} \right)^2 \tag{4}$$

whereby:

$$Q_{Ln} = \frac{U^2}{X_{Ln}} \text{ – power of the shunt reactor with } U_N \text{ and with the}$$

rated number of coils  $Z_N$ ,  $Q_L$  – power of the shunt reactor at the selected tap  $N$  and for voltage  $U$ ,  $N$  – number of the tap (negative, positive or zero),  $\Delta R$  – tap jump in % (e.g. 1.5%, 2%, 2.5%, 3%). As in the case of FSR, the randomness of the individual production of VSR enables the creation of an assumption about the Gaussian distribution only in relation to reactance  $X_{Ln}$ , as tap alignment can be performed evenly and accurately. As a result, for the rated reactance value  $X_{Ln}$ , changes of taps and differentiation of the voltage level lead to considerable variability of the shunt reactor's power, as illustrated in Fig. 4.

The ability to obtain reactive power with a variable value from VSR enables the shunt reactor to be used both in the case of stochastic uncertainty related to the value of inductance and capacity of the cable as well as in relation to voltage variation in PCC. Also in this case, a computational analysis was performed by means of the Monte Carlo simulation. The random selection of the pair  $(B_k, X_L)$  was supplemented with a computational search for digit  $N$  (tap number), which minimises the absolute value of the percentage degree of compensation. Moreover, as in the previous case, this operation was repeated in the scanning process of the full range of voltages from  $0.9 U_N$  to  $1.1 U_N$ .

The results obtained are presented in Fig. 5 and Fig. 6. Fig. 5 presents the impact of tap control (jump 1.5%) on the compensation degree. As it can be noticed, the power of the compensation release for the most part fits within the silent zone resulting from the jump of the tap changer of the shunt reactor. It is possible to narrow this zone down by selecting a shunt reactor with greater rated power on the zero tap, in accordance with the formula  $X_{Lp} = (1 + 3\sigma_L) * X_{Ln}$ .

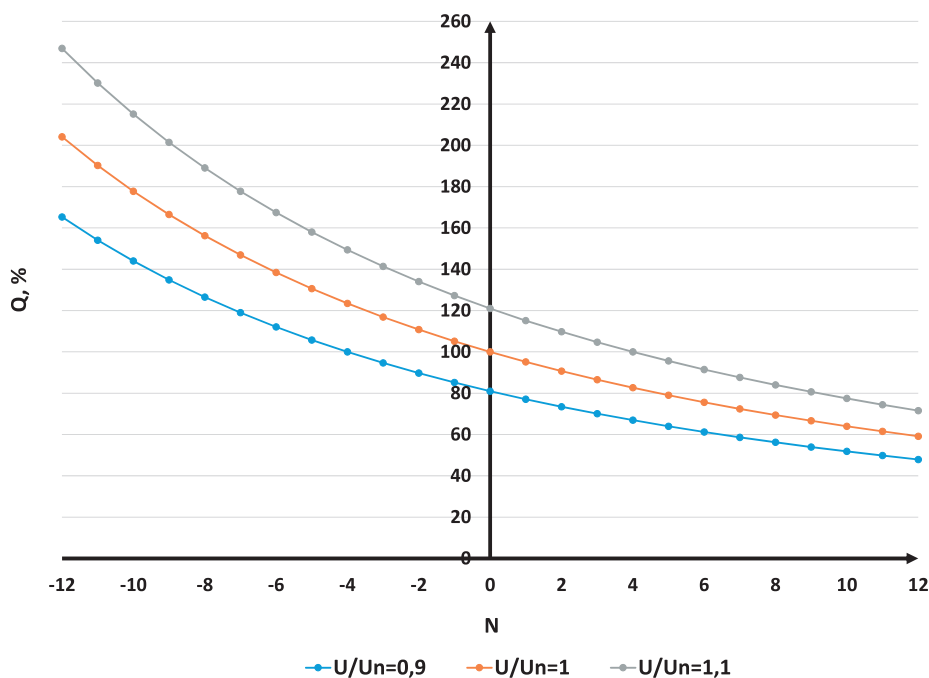


Fig. 4. Dependence of the power output of VSR with reactance  $X_{Ln}$  on the position of the tap changer and voltage value (tap jump 2.5%)

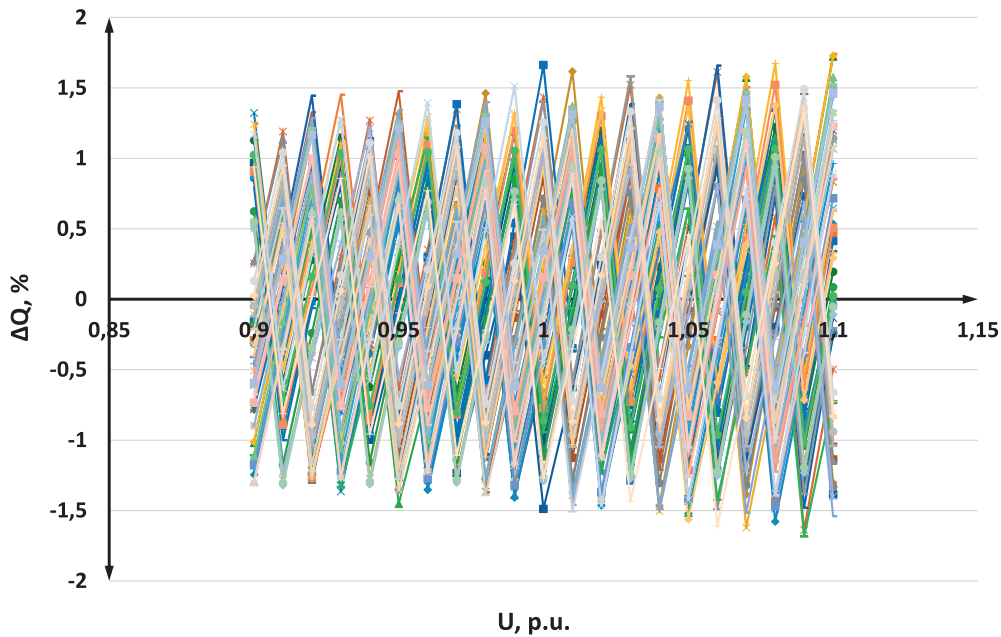


Fig. 5. Compensation degree of a cable line – results of the Monte Carlo simulation for randomly selected pairs  $(B_k, X_l)$  and a full range of changes to voltage in PCC, with the use of VSR, with the tap jump at 1.5%

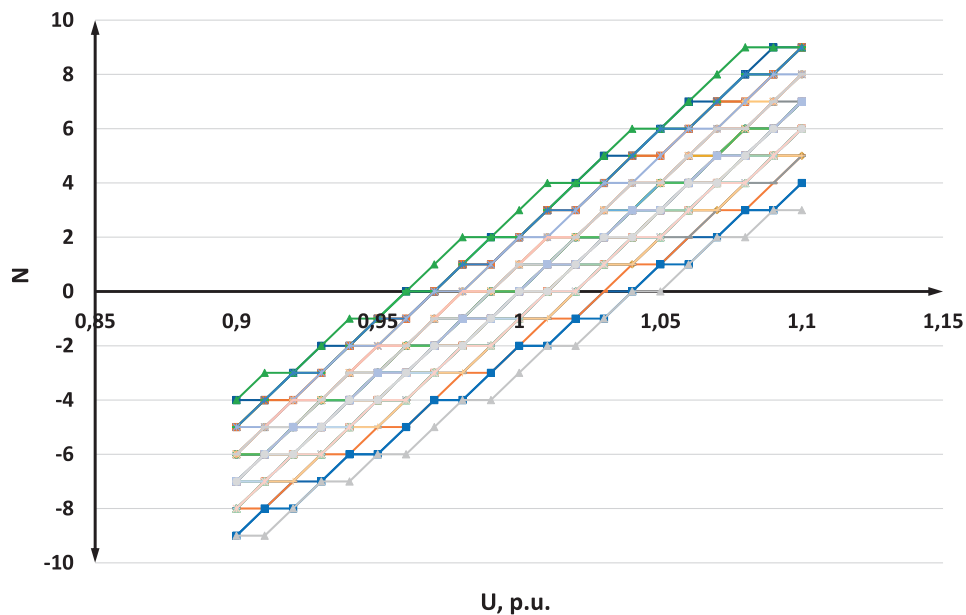


Fig. 6. Illustration of the tap selection with VSR control with jump at 1.5% – results for five randomly selected pairs  $(B_k, X_l)$  and a full range of changes to voltage in PCC, adjustment to silent zone from  $-1.5\% Q_{kn}$  to from  $1.5\% Q_{kn}$

It is also possible to use a single capacitor battery on the MV side, but with power up to 2% of  $Q_{kn}$ . Fig. 6 illustrates how for several randomly selected pairs  $(B_k, X_l)$ , the position of the tap changer is selected within the scanned range of voltages. As it can be seen, changes between +10 and -10 are sufficient to achieve a compensation degree in the silent zone with a width of 1.5%. It should be pointed out at this point, that the instruction [4], when formulating the requirements relating to the compensation of a cable line, does not specify the tolerance relating to the

accuracy of this compensation. Consequently, some designers and grid operators treat the aspects of this compensation in an almost obsessive manner, directing investors towards very costly SVC systems.

Meanwhile, the primary rule of the energy law – the non-discriminatory approach to entities – should result in the principle that the accuracy of the compensation of the cable line should not be greater than the consequences of the operation of an overhead

line of an analogous length operating in idle state. No compensation is required for 110 kV overhead lines. Taking into consideration the capacities of typical overhead lines and typical cable lines, the tolerance of the compensation of the latter should be determined at the level of 2–2.5%.

### 5. Compensation of the 110 kV cable line capacity and the potential of the wind farm to generate reactive power in the required scope

The compensation system of the 110 kV cable capacity taking the power from a wind farm should also be analysed in relation

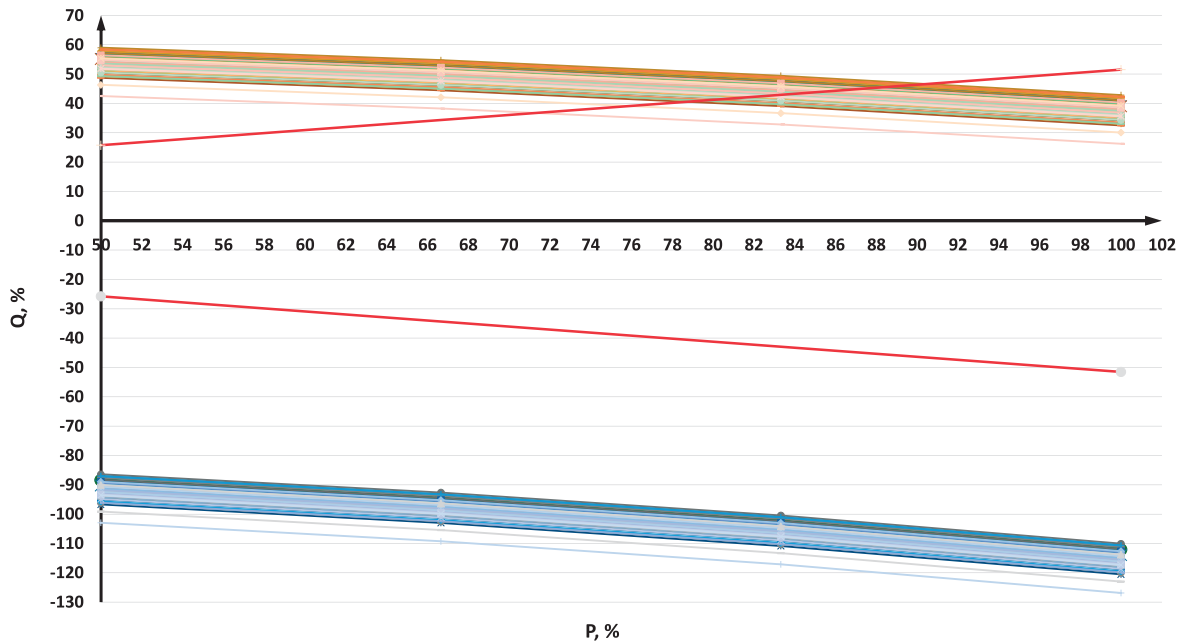


Fig. 7. Reactive power measured in the PK point (band) in the active power function generated by wind turbines – the stochastic character of the parameters of a FSR and capacity of the 110 kV cable line results from the Monte Carlo simulation; lines reflecting the power coefficient of 0.95 were indicated (inductive and capacitive character); reactive power in wind turbines  $-0.5P_{nG}$  (lower part of the illustration) and  $0.5P_{nG}$  (upper part of the illustration)

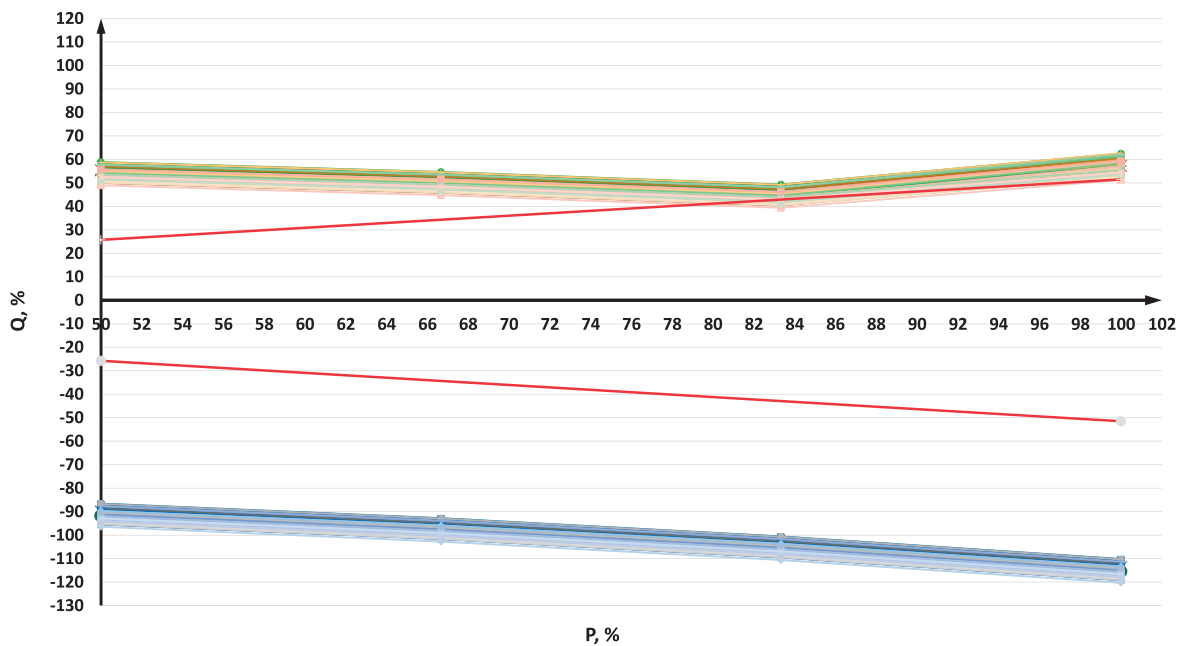


Fig. 8. Reactive power measured in the PK point (band) in the active power function generated by wind turbines – the stochastic character of the parameters of a VSR and capacity of the 110 kV cable line results from the Monte Carlo simulation; lines reflecting the power coefficient of 0.95 were indicated (inductive and capacitive character); reactive power in wind turbines  $-0.5P_{nG}$  (lower part of the illustration) and  $0.5P_{nG}$  (upper part of the illustration)

to meeting other requirements formulated in regard to wind farms in the instruction [4]. In particular, it relates to guaranteeing the potential of generation of reactive power by the wind farm so that in the entire range of possible generation of active power, the measurement of reactive power at the PK point (Fig. 1) ensures the coefficient of power no lower than 0.95 – in both directions, both in regard to reactive power consumption (value assumed for sources as negative), and to its generation.

When discussing the above issue, it should be emphasized that the converter systems, with which the wind turbines are equipped, have extensive generating abilities in reference to reactive power [5]. The majority of currently manufactured units with rated power  $P_{nG}$  equalling 2–3 MW have the ability to generate any amount of reactive power from the span from  $-0.5-0.5P_{nG}$ , within the scope of active power generation near to zero (e.g. from 20 kW) right up to full rated power  $P_{nG}$ . However, these abilities are not sufficient, as is illustrated in Fig. 7. For generation of active near rated power and for all working units, the losses of reactive power related to the transmission of active power partially negate the generating abilities of the converters. Also in this case, the ultimate effect, understood as a result of power measurement in the PK point, has a stochastic character – as decided by the uncertainty in the specification of the parameters of the 110 kV cable and shunt reactor in wind farms. The Monte Carlo simulation related to pairs  $(B_k, X_L)$ , connected with the power flow analysis, determines that the deficit of the generating abilities of the farm in the scope of reactive power (measured in the PK point) may find itself in the span between 10% and 20% of  $Q_{kn}$ . Consequently, the idea of using a multi-part capacitor battery on the MV side and the fixed shunt reactor ensures comprehensive control of the reactive power of a wind farm supplied with a cable line of a considerable length.

Similar benefits in the scope of control over the deficit of reactive power, generated by a wind farm in conditions similar to rated active power, can be achieved by the use of VSR. This shunt reactor fulfils the role of a valve which provides – for the needs of the reactive power balance of a wind farm (measured in the PK point) – a reserve of reactive power, which is the capacity of the cable. By reducing the power of the shunt reactor (by appropriate tap control, also taking voltage conditions into consideration), the state of undercompensation of the 110 kV cable is achieved, acquiring at the same time the lacking reactive power. The consequences of using a VSR are shown in Fig. 8. As can be seen, the use of additional capacitors on the MV side is unnecessary.

## 6. Overview

The article presents issues relating to the selection of a shunt reactor compensating the capacity of a long 110 kV cable line taking power out from a wind farm. The potential of using two solutions was emphasized:

- fixed shunt reactor (FSR) working with a multi-part capacitor battery installed on the MV side

- variable shunt reactor (VSR) with a correctly selected number of taps and tap jump parameters.

Both concepts – although the second option is considered more advanced – allow one to control the issue of uncertainty and tolerance relating both to the unit capacity of the 110 kV cable and reactance of the shunt reactor.

The final values of both these parameters, when referred to the individual manufacturing character of the cable and the shunt reactor, are only known at the assembly phase of the devices at a building site, which is considered by the design and construction companies as a serious hindrance.

In addition, both methods enable the requirements of grid operators to be met in relation to the values of reactive power generated by wind farms in the conditions of active power generation similar to rated power, without the need to use additional compensation systems or capacitor batteries.

## REFERENCES

1. Saadat H., Power System Analysis, McGraw-Hill International Editions, 3-rd edition, 2010.
2. Sobral A., Moura A., Carvalho M., Technical Implementation of Cross Bonding in Underground HV Lines Projects, 21-st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt 6–9 June 2011, paper 0499.
3. Iwanicki M., Dębek M., Kompensacja mocy biernej indukcyjnej oraz pojemnościowej na farmach wiatrowych [Reactive power compensation in wind power farms], *Wiadomości Elektrotechniczne* 2015, No. 2, pp. 35–38.
4. Instruction of Transmission System Operation and Maintenance of PSE S.A. [online], <http://www.pse.pl/>.
5. Lubośny Z., Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym [Wind power stations in the electric energy system], Warsaw, WNT 2010.
6. Kacejko P., Pijarski P., Generation level matching to the transmission capability of overhead lines, *Acta Energetica* 2013, No. 1/14, Vol. 5, pp. 43–49.
7. Kacejko P., Pijarski P., Przyłączenie farm wiatrowych – ograniczenia zamiast przewymiarowanych inwestycji [Grid connection of wind farms – reasonable constraints instead of oversized investments], *Rynek Energii* 2009, No. 1 (80), pp. 10–15.

---

### **Piotr Kacejko**

Lublin University of Technology

e-mail: p.kacejko@pollub.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering of Lublin University of Technology and has been an employee there since 1979. Awarded his post-doctoral degree at the Faculty of Electrical Engineering of Warsaw University of Technology in 1999, and the title of professor in 2006. He conducts research in the field of power system analyses. He is the author of numerous scientific research studies and publications in this field. He now focuses on the impact of distributed generation sources on the power grid.

### **Paweł Pijarski**

Lublin University of Technology

e-mail: p.pijarski@pollub.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science of Lublin University of Technology (2004). Awarded his doctoral degree in 2012. Since 2005, he has worked at Lublin University of Technology. His research interests are currently related to the impact of distributed generation sources on the power grid, the sensitivity of overhead power lines to changes in various sources' output powers, power flow optimization, and heuristic optimization methods. He has co-authored over a dozen articles and studies devoted to this subject.

### **Sylwester Adamek**

Lublin University of Technology

e-mail: s.adamek@pollub.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering of Lublin University of Technology. Since 2001, he has worked at the Department of Grid Network and Security at Lublin University of Technology. Awarded his doctoral degree in 2010. Specialises in the operation of distribution electricity networks and the operation of power units in the distributed power generation industry.



This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 26–33. When referring to the article please refer to the original text.

PL

## Kompensacja linii kablowych 110 kV – możliwości i ograniczenia

### Autorzy

Piotr Kacejko  
Paweł Pijarski  
Sylwester Adamek

### Słowa kluczowe

kompensacja mocy biernej, farma wiatrowa

### Streszczenie

W artykule omówiono problemy kompensacji linii kablowych 110 kV o długościach kilkudziesięciu kilometrów. Linie takie są obecnie budowane głównie w celu przyłączenia farm wiatrowych jako konsekwencja trudności w uzyskaniu pozwoleń na budowę linii napowietrznych. Praktyczne problemy projektowe wiążą się z faktem nieokreśloności pojemności kabla i reaktancji dławika (urządzenia niestandardowe produkowane jednostkowo) oraz zmiennością napięć w miejscu przyłączenia. Stosując podejście probabilistyczne, zaproponowano możliwe rozwiązania w zakresie doboru urządzeń kompensacyjnych.

### 1. Wstęp

Linie kablowe 110 kV o długościach przekraczających znacznie kilka kilometrów są dziś realnym elementem krajowej elektroenergetyki. Ich stosowanie wynika w istotnej części z faktu zdeterminowania inwestorów z branży wiatrakowej, aby planowane i budowane farmy przyłączyć do sieci. Ponieważ warunki zabudowy obszarów pomiędzy farmami a punktami przyłączenia ich do sieci (PCC) uniemożliwiają budowę tańszych linii napowietrznych, wariantem kablowym jest jedynym realnym rozwiązaniem. Operatorzy sieci 110 kV określają te linie mianem linii abonenckich, ustalając swoje wymagania w miejscu przyłączenia kabla do PCC, a linie pozostawiając w gestii operatora farmy. Kontrola mocy biernej, której linie kablowe są znaczącym źródłem, jej koordynacja z możliwościami wytwórczy farmy wiatrowej stają się istotnym problemem projektowym. Teoretycznie proste rozwiązanie polegające na zastosowaniu dławika kompensującego (ang. *Shunt Reactor* – SR) na końcu linii wiąże się z wyborem jednostki o ustalonej indukcyjności (*Fixed SR*). Jednakże zmienność warunków pracy sieci (napięcie w PCC, moc czynna farmy wiatrowej) oraz niepewność parametrów konstrukcyjnych kabla i dławika (nie są to elementy produkowane w sposób powtarzalny), zmuszają do korzystania z innych rozwiązań: dławików regulowanych pod obciążeniem za pomocą odczepów (*Variable SR*) oraz kosztownych układów FACTS z płynną regulacją (*SVC*). W artykule przedstawiono sposób alternatywnego doboru układów FSR i VSR,

uwzględniający wskazane wyżej ograniczenia. Sformułowano także postulat, aby operatorzy sieci w wydawanych warunkach przyłączenia i umowach przyłączeniowych określali poziom tolerancji formułowanych wymagań w zakresie kompensacji mocy biernej, udziału farmy w regulacji napięcia, ilości dostarczanej lub pobieranej mocy biernej. Praktyka dowodzi bowiem, że dążenie projektantów do nadmiernie dokładnego spełniania tych wymagań istotnie powiększa koszty przyłączenia do sieci, nie dając przy tym istotnych korzyści systemowych [6, 7].

### 2. Model linii kablowej z układem kompensacji – klasyka i aspekty probabilistyczne

Klasyka literatury [1] podpowiada, że linia kablowa o długości kilkudziesięciu kilometrów powinna być modelowana jako linia długa o parametrach rozłożonych. Z drugiej jednak strony linia taka powstaje jako połączenie kilku sekcji (ang. *cross bonding sections* [2]), z których każda może być modelowana za pomocą uproszczonego modelu typu II. W rezultacie możliwe jest zastosowanie modelu o strukturze drabinkowej (rys. 1). Model systemu elektroenergetycznego może być wielowęzłowym modelem dokładnym, może być też jego ekwiwalentem. Dla tak skonfigurowanego modelu dobór reaktancji  $X_L$  dławika kompensującego wydaje się być trywialną operacją obliczeniową: dławik uznaje się za dobrze dobrany, jeśli dla stanu jałowego farmy, w miejscu przyłączenia linii kablowej do systemu (węzeł PCC, punkt pomiarowy PK),

w znamionowych warunkach napięciowych  $U_{PCC} = U_N$  przepływ mocy biernej wykaże wartość zerową, czyli  $Q_{PK} = 0$ . Wartość reaktancji dławika dobrana w ten sposób może być oznaczona jako  $X_{Ln}$ .

Prostemu zadaniu obliczeniowemu praktyka przeciwstawia utrudnienia w postaci niepewności w dotrzymaniu przez wytwórców parametrów konstrukcyjnych – zarówno kabla 110 kV, jak i dławika. Tym samym zarówno wartość pojemności kabla, jak i indukcyjność dławika można uznać za określone, gdy linia kablowa zostanie zbudowana, a dławik dostarczony do rozdzielni FW 110 kV i finalnie zmontowany. Producenci niechętnie mówią o tolerancji w dokładności dotrzymania wcześniej deklarowanych parametrów, ale prędzej czy później informacje na ten temat znajdują się w umowach z inwestorem. Dodatkowo należy uwzględnić fakt, że wymagania terminowe procesu inwestycyjnego wymuszają równoległe złożenie zamówień zarówno u producenta kabli, jak i u producenta dławika.

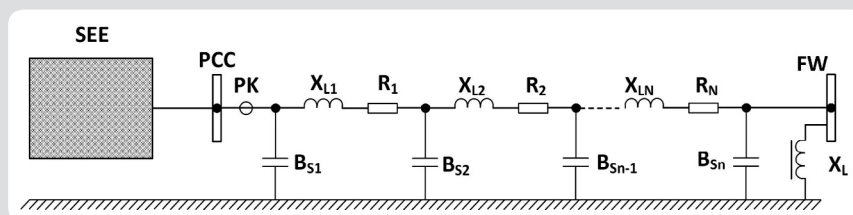
Z uwagi na ogólny charakter prezentowanego artykułu uznano, że i w produkcji kabli 110 kV, jak też dławików 110 kV, niedokładności konstrukcyjne opisuje rozkład Gaussa. Tak więc dla linii kablowej susceptancja jednostkowa  $B_K$  może być traktowana jako zmienna losowa, a prawdopodobieństwo, że jej wartość jest mniejsza lub równa od liczby  $b_K$ , jest określone zależnością:

$$P(B_K \leq b_K) = \Phi\left(\frac{b_K - B_{Kn}}{\sigma_K}\right) \quad (1)$$

oraz analogicznie dla dławika, prawdopodobieństwo, że wartość reaktancji  $X_L$  będzie mniejsza lub równa od liczby  $x_L$ , wyraża zależność:

$$P(X_L \leq x_L) = \Phi\left(\frac{x_L - X_{Ln}}{\sigma_L}\right) \quad (2)$$

przy czym w obydwu przypadkach funkcja  $\Phi$  oznacza dystrybucję rozkładu normalnego  $N(0,1)$ , natomiast  $B_{Kn}$  oraz  $X_{Ln}$  oznaczają odpowiednio wartości susceptancji



Rys. 1. Model obliczeniowy linii kablowej wyprowadzającej moc z farmy wiatrowej (FW) wraz z dławikiem kompensującym

jednostkowej kabla 110 kV oraz reaktancji dławika kompensującego przyjęte przez producentów jako znamionowe, na podstawie obliczeń omówionych wyżej. Niepewność związaną z procesami produkcyjnymi (kable i dławika) wyraża odchylenie standardowe (odpowiednio dla kabla  $\sigma_k$ , a dla dławika  $\sigma_L$ ). Bazując na skąpych informacjach uzyskanych od producentów, przyjęto (w ocenie autorów pesymistycznie) dla obydwu elementów wartości  $3\sigma_k/B_{kn} = 0,075$  oraz  $3\sigma_L/X_{L,n} = 0,075$ . Oznacza to, że „kryterium 3-sigmowe” obejmuje obszar o szerokości  $\pm 7,5\%$  w stosunku do wartości uznanych za znamionowe.

Parametrem sieciowym o zmiennej wartości jest napięcie na szynach stacji PCC. Prawdopodobnie i tu można by stosować podejście stochastyczne, przyjmując, że najbardziej prawdopodobna wartość napięcia dla dużej stacji systemowej to  $1,05 U_N$  (czyli 115,5 kV), a wartości istotnie mniejsze (np.  $0,95 U_N$  lub  $1,10 U_N$ ) występują rzadko i są związane z nietypowymi stanami systemu elektroenergetycznego. Z drugiej jednak strony wymagania operatorów nie pozostawiają wątpliwości, co do konieczności spełnienia warunków kompensacji dla pełnego zakresu spodziewanych napięć od  $0,90 U_N$  do  $1,10 U_N$ . Tym samym metodyka prowadzonych badań w każdym przypadku obejmowała skanowanie wskazanego wyżej pełnego zakresu napięć na szynach PCC.

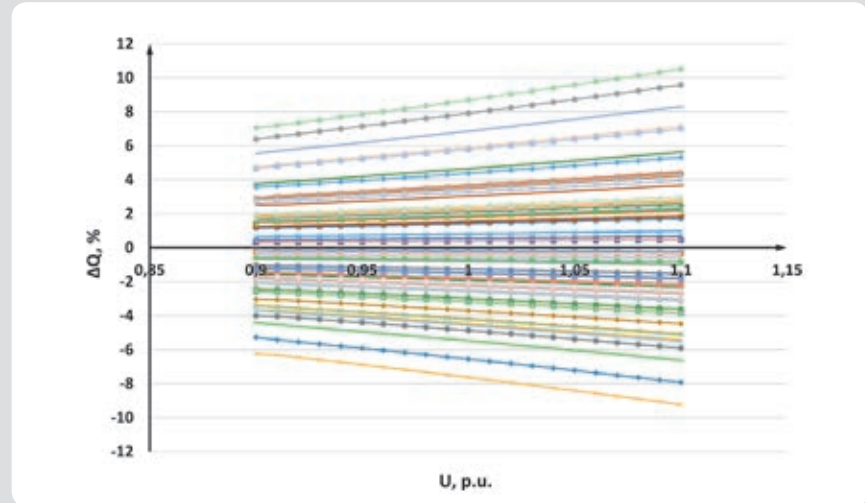
### 3. Nieskuteczność podejścia deterministycznego – wyniki symulacji Monte Carlo

Zakładając losowy charakter parametrów  $B_K$  oraz  $X_L$ , skuteczność kompensacji pojemności linii kablowej wykorzystującej dławik o nieregulowanej indukcyjności (FSR) może być zbadana za pomocą symulacji Monte Carlo. Przyjmując rozkłady prawdopodobieństwa zdefiniowane za pomocą wzorów (1) oraz (2), odpowiednia para wielkości ( $B_K$ ,  $X_L$ ) może być losowana za pomocą generatora liczb losowych, a wynik takiego losowego doboru pojemności kabla i indukcyjności dławika może zostać zweryfikowany za pomocą obliczeń rozplywowych. Weryfikacja obliczeniowa powinna obejmować pełny zakres napięć dopuszczalnych na szynach stacji PCC. Wyniki tak przeprowadzonej symulacji dla 100 wylosowanych par (susceptancja jednostkowa kabla, indukcyjność dławika), przedstawiono na rys. 2, przy czym procentowy stopień kompensacji zdefiniowano jako:

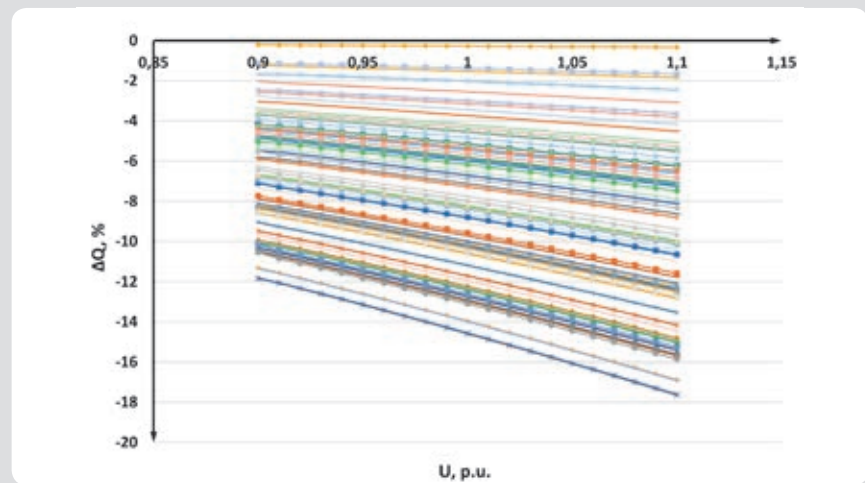
$$\Delta Q_{\%} = \frac{Q_C - Q_L}{Q_{kn}} \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie jako  $Q_{kn}$  zdefiniowano moc dławika zapewniającą idealną kompensację, przy pojemności  $B_{kn}$  i napięciu  $U_{PCC} = U_N = 110$  kV.

Jak pokazano na rys. 2, losowy charakter parametrów kabla oraz dławika powoduje, że dla wartości napięcia w PCC wynoszącej 121 kV stopień kompensacji zamiast wartości zerowej może wynieść nawet 10% (zarówno w stronę dodatnią, jak i ujemną). Oznacza to, że przy mocy ładowania 100 Mvar (np. 2 linie kablowe pracujące



Rys. 2. Stopień skompensowania linii kablowej – wyniki symulacji Monte Carlo dla losowo wybranych par ( $B_K$ ,  $X_L$ ) i pełnego zakresu zmian napięcia w PCC



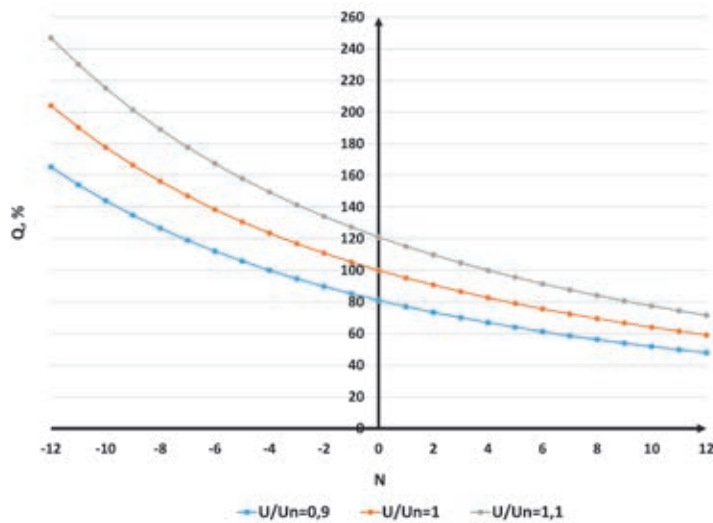
Rys. 3. Stopień skompensowania linii kablowej – wyniki symulacji Monte Carlo dla losowo wybranych par ( $B_K$ ,  $X_L$ ) i pełnego zakresu zmian napięcia w PCC, przy powiększonej do wartości  $X_{L,p}$  reaktancji znamionowej dławika

równoległe o długości 50 km) można ocenić niedokompensowania o wartości 10 Mvar (zbyt mała moc dławika) lub przekompensowania (zbyt duża moc dławika) o wartości  $-10$  Mvar. Z punktu widzenia praktyki zjawisko niedokompensowania jest znacznie bardziej kłopotliwe, bo mocy dławika zwiększyć się nie da, a jego wymiana, z uwagi na koszty, nie wchodzi w grę. Stąd też próba alternatywnego podejścia zaproponowana przez autorów niniejszego artykułu – jako wartość znamionową reaktancji dławika określoną dla wytwórcy w zamówieniu podaje się  $X'_{L,p} = (1 + 3\sigma_L) \cdot X_{L,n}$ . Oczywiście dławik o reaktancji określonej w ten sposób też będzie podlegał losowemu procesowi produkcji zdefiniowanemu za pomocą rozkładu Gaussa, analogicznego jak w poprzednim przypadku. Tym razem jednak losowy charakter reaktancji dławika i pojemności kabla nigdy nie spowoduje niedokompensowania linii kablowej – zawsze jest to przekompensowanie, co wskazuje rys. 3. Opanowanie przekompensowania jest jednak względnie łatwe – może być zrealizowane za pomocą kondensatorów

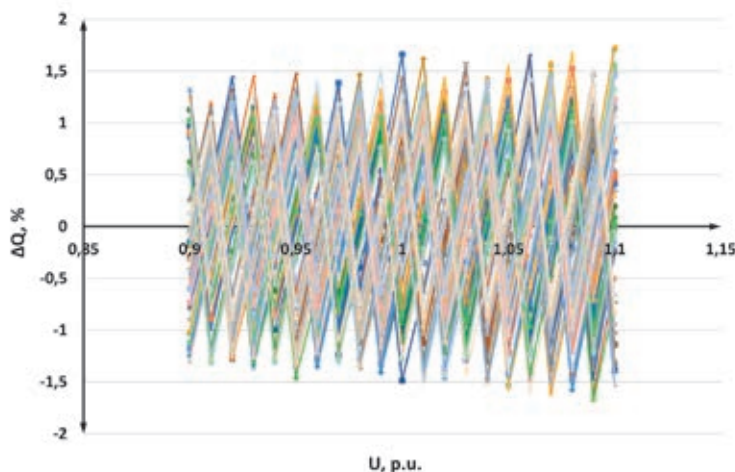
przyłączonych do szyn średniego napięcia rozdzielni FW. Kondensatory takie są produkowane seryjnie i stosunkowo łatwo dostępne, dlatego o ich liczbie i mocy można zdecydować na późniejszym etapie procesu inwestycyjnego. Z rys. 2 można wnioskować, że stopień przekompensowania zawiera się w przedziale od zera do  $-18\%$ . Można jednak wykazać, że uzasadnione jest zainstalowanie „w ciemno” baterii sześcioczołowej o mocy odpowiadającej  $12\% Q_{kn}$ , przy zapewnieniu możliwości dostawienia dodatkowych jednostek o łącznej mocy  $8\% Q_{kn}$  (razem moc baterii  $20\% Q_{kn}$ ). Przyczynę takiego podejścia uzasadnia dalsza część artykułu.

### 4. Rozwiązanie alternatywne – dławik regulowany

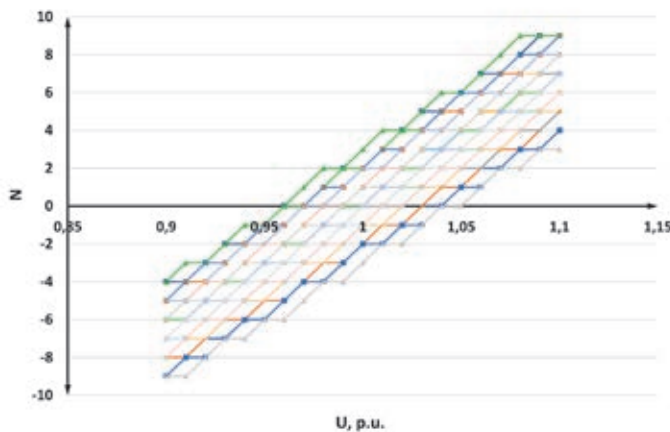
Zastosowanie dławika o ustalonej (choć wstępnie nieokreślonej) reaktancji wraz z baterią kondensatorów po stronie SN pozwala na opanowanie problemu kompensacji nawet w sytuacji niepewności w zakresie pojemności linii kablowej oraz w warunkach zmienności napięć na szynach PCC. Zastosowanie dławika o ustalonej



Rys. 4. Zależność mocy wyjściowej dławika regulowanego VSR od reaktancji  $X_{Ln}$  od położenia przełącznika zacze- pów i wartości napięcia (skok zacze- pu 2,5%)



Rys. 5. Stopień skompensowania linii kablowej – wyniki symulacji Monte Carlo dla losowo wybranych par  $(B_K, X_L)$  i pełnego zakresu zmian napięcia w PCC, przy wykorzystaniu dławika regulowanego VSR, o skoku zacze- pu 1,5%



Rys. 6. Ilustracja doboru zacze- pu przy regulacji dławika VSR o skoku 1,5 %, – wyniki dla pięciu losowo wybranych par  $(B_K, X_L)$  i pełnego zakresu zmian napięcia w PCC, regulacja do strefy martwej od -1,5%  $Q_{kn}$  do od 1,5%  $Q_{kn}$

wartości reaktancji (FSR) można zastąpić zastosowaniem dławika o regulacji zacze- powej (VSR). Nieliczni producenci takich dławików podejmują się jednostkowej produkcji elementów, których moc okreś- ślona jest zgodnie z zależnością

$$Q_L = Q_{Ln} \frac{(U/U_N)^2}{(Z/Z_N)^2} = Q_{Ln} \cdot (U/U_N)^2 \cdot \left( \frac{100}{100 + N \cdot \Delta R} \right)^2 \quad (4)$$

przy czym:

$$Q_{Ln} = \frac{U_N^2}{X_{Ln}}$$

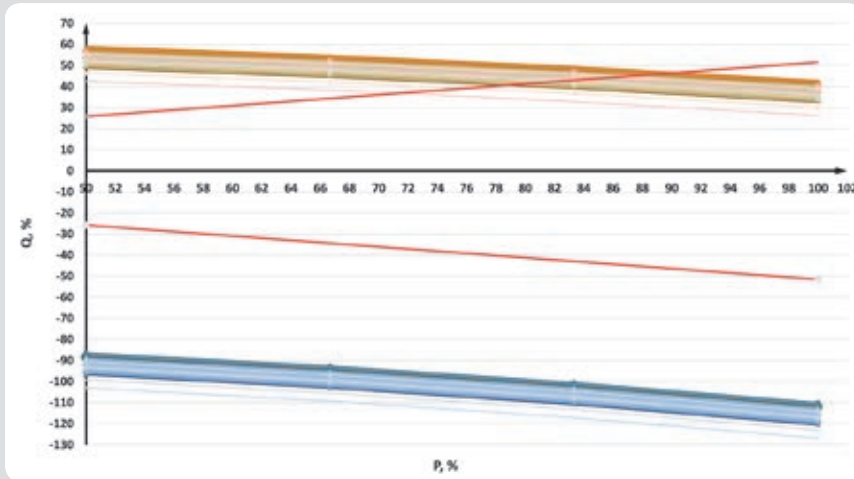
– moc dławika przy  $U_N$  i przy znamionowej liczbie zwojów  $Z_N$ ,  $Q_L$  – moc dławika przy wybranym zacze- pu  $N$  oraz dla napięcia  $U$ ,  $N$  – numer zacze- pu (dodatni, ujemny lub zero),  $\Delta R$  – skok zacze- pu w % (np. 1,5%, 2%, 2,5%, 3%).

Tak jak i w przypadku dławika FSR, losowość jednostkowej produkcji dławika VSR upoważnia do przyjęcia założenia o rozkładzie Gaussa jedynie w stosunku do reaktancji  $X_{Ln}$ , bowiem wyprowadzenie zacze- pów może być zrealizowane w sposób równomierny i dokładny.

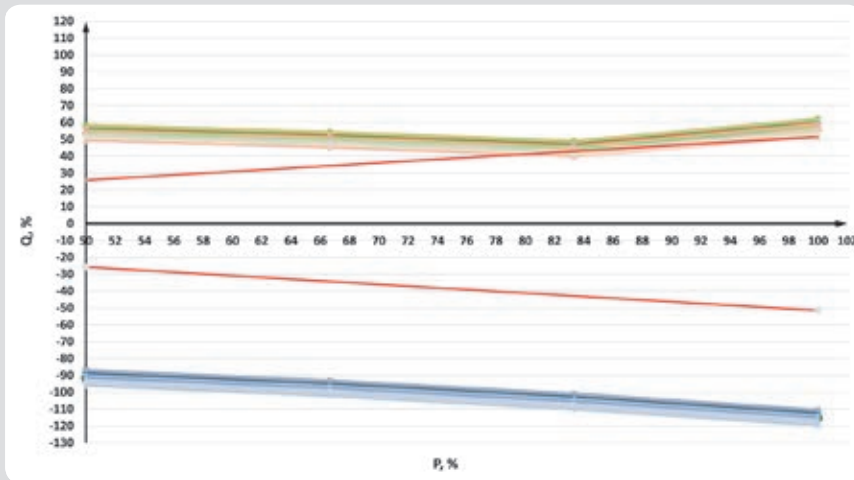
W rezultacie dla znamionowej wartości reaktancji  $X_{Ln}$  zmiany zacze- pów oraz zróż- nicowanie poziomu napięcia prowadzi do znaczącej zmienności mocy dławika, której charakter pokazuje rys. 4.

Możliwość uzyskiwania z dławika VSR mocy biernej o zmiennej wartości pozwala na wykorzystanie go zarówno w przypadku stochastycznej niepewności związanej z wartością indukcyjności i pojemności kabla, jak też w związku ze zmiennością napięcia w PCC. Także i w tym przypadku przeprowadzono analizę obliczeniową wykorzystującą symulację Monte Carlo. Proces losowania pary wielkości  $(B_K, X_L)$  uzupełniono obliczeniowym poszukiwaniem takiej liczby  $N$  (numer zacze- pu), która minimalizuje wartość bezwzględną procentowego stopnia kompensacji. Dodatkowo, tak jak w poprzednim przypadku, operację tę powtórzono w procesie skano- wania pełnego zakresu napięć od  $0,9 U_N$  do  $1,1 U_N$ .

Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5 oraz rys. 6. Rysunek 5 przedstawia wpływ regulacji zacze- powej (skok 1,5%) na stopień skompensowania. Jak można zauważyć, moc rozkompensowania mieści się zasadniczo w zakresie strefy martwej wyni- kającej ze skoku przełącznika zacze- pów dławika. Możliwe jest zawężenie tej strefy poprzez dobór dławika o większej mocy znamionowej na zacze- pu zerowym, zgodnie z formułą  $X_{Lp} = (1 + 3\sigma_L) \cdot X_{Ln}$ . Możliwe jest też zastosowanie pojedynczej baterii kondensatorów po stronie SN, ale o mocy do 2%  $Q_{kn}$ . Rysunek 6 ilustruje, jak dla kilku wylosowanych par  $(B_K, X_L)$  w skanowanym przedziale napięć dobie- rana jest pozycja przełącznika zacze- pów. Jak widać, zmiany od +10 do -10 są wystarczające w celu osiągnięcia stopnia kompensacji w strefie martwej o szerokości 1,5%.



Rys. 7. Moc bierna mierzona w punkcie PK (pasma) w funkcji mocy czynnej generowanej w wiatrakach FW – stochastyczny charakter parametrów dławika FSR oraz pojemności linii kablowej 110 kV wynika z symulacji Monte Carlo; wskazano linie odpowiadające współczynnikowi mocy 0,95 (charakter indukcyjny i pojemnościowy); moc bierna w wiatrakach  $-0,5P_{nG}$  (część dolna rysunku) oraz  $0,5P_{nG}$  (część górna rysunku)



Rys. 8. Moc bierna mierzona w punkcie PK (pasma) w funkcji mocy czynnej generowanej w wiatrakach FW – stochastyczny charakter parametrów dławika VSR oraz pojemności linii kablowej 110 kV wynika z symulacji Monte Carlo; wskazano linie odpowiadające współczynnikowi mocy 0,95 (charakter indukcyjny i pojemnościowy); moc bierna w wiatrakach  $-0,5P_{nG}$  (część dolna rysunku) oraz  $0,5P_{nG}$  (część górna rysunku)

Warto w tym miejscu zauważyć, że instrukcja [4], formułując wymaganie odnośnie kompensacji pojemności linii kablowej, nie podaje tolerancji w zakresie dokładności tej kompensacji. W rezultacie, niektórzy projektanci i operatorzy sieci, traktując kwestie tej kompensacji wręcz obsesyjnie, kierują inwestora ku niezwykle kosztownym układom SVC. Tymczasem, z podstawowej zasady prawa energetycznego – niedyskryminacyjnego podejścia do podmiotów – powinna wynikać zasada, aby dokładność kompensacji linii była nie większa niż skutki pracy linii napowietrznej analogicznej długości pracującej w stanie jałowym. Wobec linii napowietrznych 110 kV nikt bowiem kompensacji nie wymaga. Uwzględniając stosunek pojemności typowych linii napowietrznych i typowych linii kablowych, tolerancję kompensacji tych ostatnich powinno się określać na poziomie 2–2,5 %.

**5. Kompensacja pojemności linii kablowej 110 kV a zdolność FW do produkcji mocy biernej w wymaganym zakresie**  
 Układ kompensacji pojemności kabla 110 kV wyprowadzającego moc z farmy wiatrowej powinien być rozpatrywany także pod kątem spełnienia innych wymagań sformułowanych w stosunku do farmy w Instrukcji [4]. W szczególności chodzi o zapewnienie możliwości generacji mocy biernej farmy, tak aby w całym zakresie możliwej generacji mocy czynnej (wartość współczynnika mocy nie mniejszy niż 0,95 – w obydwu kierunkach, zarówno w zakresie poboru mocy biernej (wartość przyjmowana dla źródeł jako ujemna), jak też jej generacji. Omawiając powyższy problem, warto przypomnieć, że układy przekształtnikowe, w które wyposażone są wiatraki, mają bardzo szerokie możliwości generacyjne w odniesieniu do mocy biernej [5].

Większość obecnie produkowanych jednostek o mocach znamionowych  $P_{nG}$  równych 2–3 MW ma zdolność generacji każdej ilości mocy biernej z przedziału od  $-0,5-0,5P_{nG}$ , w zakresie generacji mocy czynnej prawie od zera (np. od 20 kW) aż do pełnej mocy znamionowej  $P_{nG}$ . Okazuje się jednak, że nie są to możliwości wystarczające, co ilustruje rys. 7. Dla generacji mocy czynnej bliskiej znamionowej i dla wszystkich jednostek pracujących straty mocy biernej związane z przesyłem mocy czynnej niweczą częściowo możliwości generacyjne przekształtników. Także i w tym przypadku ostateczny efekt rozumiany jako wynik pomiaru mocy w punkcie PK ma charakter stochastyczny – decyduje o tym niepewność w określaniu parametrów kabla 110 kV oraz dławika kompensującego w FW. Symulacja Monte Carlo odniesiona do par  $(B_K, X_L)$ , połączona z analizą rozprywową, wskazuje, że deficyt możliwości generacyjnych farmy w zakresie mocy biernej (mierzonej w punkcie PK) może zawierać się w przedziale od 10% do 20%  $Q_{kn}$ . Tym samym idea zastosowania wieloczołowej baterii kondensatorów po stronie SN oraz dławika o stałej mocy daje gwarancje kompleksowego opanowania problemu mocy biernej FW, zasilanej linią kablową o znacznej długości.

Podobne korzyści w zakresie opanowania deficytu mocy biernej generowanej w farmie wiatrowej, w warunkach zbliżonych do znamionowej mocy czynnej, daje zastosowanie dławika regulowanego VSR. Dławik ten pełni wtedy rolę swoistego zaworu, który udostępnia na potrzeby bilansu mocy biernej farmy (mierzonego w punkcie PK) rezerwar mocy biernej, którym jest pojemność kabla. Zmniejszając moc dławika (poprzez odpowiednią regulację zaczepek uwzględniając także warunki napięciowe), osiąga się stan niedokompensowania kabla 110 kV, zyskując jednocześnie brakującą moc bierną. Efekt zastosowania dławika VSR pokazano na rys. 8. Jak widać, stosowanie dodatkowych kondensatorów po stronie SN jest zbędne.

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono problem doboru dławika kompensującego pojemność długiej linii kablowej 110 kV wyprowadzającej moc z farmy wiatrowej. Wskazano na możliwość zastosowania dwóch rozwiązań:

- dławika o stałej wartości indukcyjności (FSR) współpracującego z wieloczołową baterią kondensatorów zainstalowaną po stronie średniego napięcia
- dławika o regulacji zaczepek (VSR) o odpowiednio dobranej liczbie zaczepek i skoku zaczepek.

Obydwie koncepcje – choć za bardziej zaawansowaną technicznie uznaje się drugą – pozwalają na opanowanie problemu niepewności i tolerancji dotyczącego zarówno pojemności jednostkowej kabla 110 kV, jak i reakcji dławika. Finalne wartości obydwu tych wielkości, wobec jednostkowego charakteru produkcji kabla, jak i dławika, są znane dopiero w fazie montażu urządzeń na placu budowy, co firmy projektowe i wykonawcze uznają za poważne utrudnienie.

Dodatkowo obydwie metody pozwalają na spełnienie wymagań operatorów sieci w zakresie wartości mocy biernej generowanej przez farmy wiatrowe w warunkach generacji mocy czynnej zbliżonej do znamionowej, bez konieczności stosowania dodatkowych układów kompensacyjnych i baterii kondensatorów.

### Bibliografia

1. Saadat H., Power System Analysis, McGraw-Hill International Editions, 3-rd edition, 2010.
2. Sobral A., Moura A., Carvalho M., Technical Implementation of Cross Bonding in Underground HV Lines Projects, 21-st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt 6–9 czerwca 2011, paper 0499.
3. Iwanicki M., Dębek M., Kompensacja mocy biernej indukcyjnej oraz pojemnościowej na farmach wiatrowych, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2015, nr 2, s. 35–38.
4. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej PSE SA [online], <http://www.pse.pl/>.
5. Lubośny Z., Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, Warszawa, WNT 2010.
6. Kacejko P., Pijarski P., Generation level matching to the transmission capability of overhead lines, *Acta Energetica* 2013, nr 1/14, s. 43–49.
7. Kacejko P., Pijarski P., Przyłączanie farm wiatrowych – ograniczenia zamiast przewymiarowanych inwestycji, *Rynek Energii* 2009, nr 1 (80), s. 10–15.

### Piotr Kacejko

prof. dr hab. inż.

Politechnika Lubelska

e-mail: p.kacejko@pollub.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej i pracownik uczelni od 1979 roku. Habilitację uzyskał w 1999 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, a tytuł profesora w 2006 roku. Prowadzi badania z zakresu analiz systemu elektroenergetycznego. Jest autorem kilkudziesięciu prac naukowo-badawczych oraz publikacji z tej dziedziny. Aktualnie zajmuje się problematyką oddziaływania rozproszonych źródeł wytwórczych na sieć elektroenergetyczną.

### Paweł Pijarski

dr inż.

Politechnika Lubelska

e-mail: p.pijarski@pollub.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2004). Pracę doktorską obronił w 2012 roku. Od 2005 roku jest pracownikiem Politechniki Lubelskiej. Jego zainteresowania naukowe związane są obecnie z wpływem oddziaływania rozproszonego lokowania źródeł wytwórczych na pracę systemu elektroenergetycznego, wrażliwością elektroenergetycznych linii napowietrznych na zmiany mocy generowanych w poszczególnych źródłach wytwórczych, optymalizacją rozpyłów mocy biernej, a także heurystycznymi metodami optymalizacji. Współautor kilkudziesięciu artykułów i prac poświęconych tej tematyce.

### Sylwester Adamek

dr inż.

Politechnika Lubelska

e-mail: s.adamek@pollub.pl

Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej, od 2001 roku pracuje w Katedrze Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń tejże uczelni. Pracę doktorską obronił w 2010 roku. Zajmuje się pracą dystrybucyjnych sieci elektroenergetycznych oraz pracą jednostek wytwórczych energetyki rozproszonej.